

喀斯特地区坡面水土流失耦合模拟模型构建及精度验证

马戌

DOI:10.32629/hwr.v10i1.6779

[摘要] 喀斯特地区生态环境脆弱,坡面水土流失问题严重,准确模拟该地区的水土流失过程对于生态保护和治理至关重要。本文旨在构建喀斯特地区坡面水土流失耦合模拟模型并进行精度验证。通过综合考虑喀斯特地区独特的地形地貌、土壤特性、植被覆盖以及降雨等因素,采用多源数据融合的方法构建耦合模型。利用实测数据对模型进行率定和验证,分析模型模拟结果与实际情况的吻合程度。研究表明,所构建的耦合模拟模型能够较好地反映喀斯特地区坡面水土流失的特征和规律,为该地区水土流失的预测和治理提供了科学依据和有效工具。

[关键词] 喀斯特地区; 坡面水土流失; 耦合模拟模型; 精度验证; 生态保护
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A

Construction and Accuracy Verification of a Coupled Simulation Model for Soil and Water Loss on Slope Surfaces in Karst Areas

Xu Ma

[Abstract] The ecological environment in karst areas is fragile, and the problem of soil and water loss on slope surfaces is severe. Accurate simulation of the soil and water loss process in this region is crucial for ecological protection and management. This paper aims to construct a coupled simulation model for soil and water loss on slope surfaces in karst areas and verify its accuracy. By comprehensively considering factors such as the unique topography, soil characteristics, vegetation cover, and rainfall in karst areas, a coupled model is constructed using multi-source data fusion. The model is calibrated and validated using measured data to analyze the degree of consistency between the simulated results and the actual situation. The research results show that the constructed coupled simulation model can better reflect the characteristics and patterns of soil and water loss on slope surfaces in karst areas, providing a scientific basis and effective tool for predicting and managing soil and water loss in this region.

[Key words] karst area; slope soil erosion; coupled simulation model; accuracy verification; ecological protection

引言

喀斯特地区以其独特的岩溶地貌而闻名,然而,这种特殊的地质背景也导致该地区生态环境极为脆弱。坡面水土流失作为喀斯特地区主要的生态环境问题之一,不仅会导致土壤肥力下降、土地退化,还会引发一系列生态灾害,如泥石流、滑坡等,严重威胁着当地居民的生命财产安全和生态系统的稳定。因此,深入研究喀斯特地区坡面水土流失的过程和机制,构建准确有效的模拟模型,对于科学制定水土流失治理措施、保护生态环境具有重要的现实意义。目前,虽然已有一些水土流失模拟模型,但针对喀斯特地区特殊条件的耦合模拟模型还相对较少。本文将致力于构建适用于喀斯特地区的坡面水土流失耦合模拟模型,并对其精度进行验证。

1 喀斯特地区坡面水土流失特征分析

1.1 地形地貌对水土流失的影响

喀斯特地区地形起伏较大,峰林、峰丛、洼地等地形地貌特征明显。陡峭的山坡使得地表径流速度加快,增加了水流对土壤的侵蚀力。岩溶地貌发育,地下溶洞、暗河众多,地表与地下水系相互连通,导致水土流失过程更为复杂。部分坡面在降雨过程中,地表径流可能迅速下渗到地下,通过地下管道流失,使得水土流失的监测和模拟难度增大。地形的破碎性也使得土壤侵蚀的空间分布差异显著,不同坡度、坡向的坡面水土流失程度不同。

1.2 土壤特性与水土流失的关系

喀斯特地区土壤具有土层浅薄、肥力低、透水性强等特点。浅薄的土层使得土壤的抗侵蚀能力较弱,容易被水流冲刷带走。土壤的高透水性导致降雨后地表径流形成时间短,产流过程复杂。土壤中富含碳酸钙等物质,在水流的作用下容易发生溶解和迁移,进一步加剧了水土流失。土壤的颗粒组成和结构也会影响水土流失的程度,如砂质土壤更容易被侵蚀。

1.3 植被覆盖对水土流失的作用

植被在喀斯特地区坡面水土流失控制中起着关键作用。植被的根系可以固土保水,增加土壤的稳定性,减少土壤侵蚀。植被的冠层可以截留降雨,降低雨滴对地表的冲击力,减缓地表径流的形成速度。然而,由于喀斯特地区生态环境脆弱,植被恢复难度较大,部分地区植被覆盖率较低,无法有效发挥其水土保持功能。不同类型的植被对水土流失的控制效果也存在差异,例如,乔木林的水土保持能力通常优于灌木林和草地。

2 坡面水土流失耦合模拟模型的构建

2.1 模型构建的理论基础

本文构建的耦合模拟模型基于水文学、土壤侵蚀学和生态学等多学科理论。在水文学方面,考虑了降雨、蒸发、入渗和地表径流等过程,采用了基于物理过程的水文模型来模拟水流运动。在土壤侵蚀学方面,结合了通用土壤流失方程(USLE)等经典理论,考虑了降雨侵蚀力、土壤可蚀性、坡度坡长、植被覆盖和水土保持措施等因素对土壤侵蚀的影响。引入了生态学原理,考虑了植被的生长和演替对水土流失的动态影响。

2.2 模型结构与参数确定

模型主要由水文模块、土壤侵蚀模块和植被模块组成。水文模块用于模拟降雨产流过程,通过计算降雨入渗、地表径流和地下径流等,确定水流的运动路径和流量。土壤侵蚀模块根据水文模块的输出结果,计算土壤的侵蚀量和输沙量。植被模块则模拟植被的生长、死亡和覆盖度变化,为土壤侵蚀模块提供植被覆盖参数。模型中的参数通过实地调查、实验测量和文献资料等方法确定。例如,降雨侵蚀力参数通过长期降雨数据计算得到,土壤可蚀性参数通过土壤样本的分析实验确定。

2.3 多源数据融合在模型中的应用

为了提高模型的准确性和可靠性,采用了多源数据融合的方法。利用气象站的降雨、气温等数据,卫星遥感影像的植被覆盖、土地利用等数据,以及实地监测的土壤水分、径流和泥沙含量等数据。将这些数据进行处理和分析,提取有用的信息,输入到模型中。例如,通过遥感影像获取的植被覆盖度数据可以实时更新模型中的植被参数,提高模型对植被动态变化的模拟能力。利用地理信息系统(GIS)技术对数据进行空间分析和处理,实现模型的空间化模拟。

3 模型的率定与精度验证

3.1 率定方法与过程

模型的率定是通过系统性调整模型中的关键参数,使模拟输出的径流过程、产沙量、峰值流量及退水特征等与野外长期观测的实测数据在时间序列和统计特征上高度一致。采用试错法与智能优化算法协同推进的策略,在充分吸收区域水文地质认知与既有研究成果基础上,合理划定坡度、岩溶裂隙密度、表层土壤厚度、植被覆盖度等核心参数的物理可行区间。以典型喀斯特坡面为率定单元,兼顾不同岩性组合、土地利用类型与降雨强度等级下的多情景观测资料,重点验证模型对峰现时刻、洪量分配及泥沙输移阶段性的模拟能力,确保所率定参数兼具物

理意义与区域代表性,真实反映喀斯特坡地水土流失的独特响应机制。

3.2 验证数据的选取与处理

为了验证模型的精度,选取了与率定数据来源不同、时间独立、空间分布更具代表性的坡面实测数据进行验证。验证数据涵盖多年多场次自然降雨事件,包括短历时强降雨与长历时弱降雨等典型情景,同步记录了地表径流过程、产沙过程、径流深、产沙量及泥沙含量动态变化等关键指标。对验证数据严格开展质量控制和预处理,剔除仪器故障、人为干扰及明显偏离物理规律的异常值,修正传感器漂移与滞后误差。依据模型输出的时间步长与空间单元尺度,将实测数据统一重采样并匹配至相应网格与时段,确保时空可比性,为后续定量评估奠定基础。

3.3 精度评价指标与结果分析

采用了多种精度评价指标来评估模型的性能,如纳什效率系数(NSE)、均方根误差(RMSE)和相关系数(R^2)等。纳什效率系数反映了模型模拟值与实测值之间的拟合程度,其值越接近1,表示模型精度越高。均方根误差衡量了模型模拟值与实测值之间的平均误差,误差越小表示模型精度越高。相关系数则反映了模型模拟值与实测值之间的线性相关性。通过对验证数据的分析,得到了模型在不同指标下的精度评价结果。结果表明,模型在大多数情况下能够较好地模拟喀斯特地区坡面水土流失的过程,但在某些特殊情况下,如极端降雨事件,模型的精度还有待提高。

4 模型的应用与展望

4.1 模型在水土流失预测中的应用

利用构建的耦合模拟模型,可以对喀斯特地区坡面水土流失进行多情景动态预测。通过输入不同强度与历时的降雨情景、典型土地利用变化过程以及差异化植被恢复方案,系统模拟未来不同时空尺度下坡面侵蚀产沙、径流汇流及土壤层厚度演变趋势。该模型充分考虑喀斯特区土层薄、基岩裸露、地下裂隙发育、地表径流与地下径流交互频繁等关键特征,实现地表—地下双路径水文过程与土壤侵蚀过程的协同响应模拟。这有助于科学预判生态退化风险,提前制定精准化水土流失治理措施,优化坡耕地整治、石漠化综合治理和水源涵养林配置等生态保护工程布局,提升区域水土资源可持续利用能力。

4.2 模型对生态保护和治理的指导意义

模型的模拟结果可以为喀斯特地区的生态保护和治理提供科学依据。通过系统分析岩性结构、降水强度、土地利用类型、植被覆盖度及地形坡度等多因子耦合作用下水土流失的发生机制与空间分异规律,精准识别生态脆弱带与高风险流失区。在此基础上,科学划定优先治理单元,例如对石漠化程度深、表土层薄、植被覆盖率低且坡度大于二十五度的陡坡地段,因地制宜实施封山育林、乔灌草立体配置、小型拦蓄工程与生态产业引导相结合的综合治理。模型还可动态模拟不同措施组合下的长期水土保持效应与生态恢复进程,支撑治理路径的迭代优化与适应性管理。

4.3 模型的局限性与未来研究方向

尽管本文构建的耦合模拟模型在喀斯特地区坡面水土流失模拟中取得了一定的成果,但模型仍存在一些局限性。例如,模型对地下岩溶水系的模拟还不够精确,对一些复杂的生态过程的考虑还不够全面。未来的研究方向包括进一步完善模型的结构和参数,提高模型对地下岩溶水系和生态过程的模拟能力。加强多源数据的融合和应用,提高模型的准确性和可靠性。开展模型的不确定性分析,为模型的应用提供更科学的决策依据。

5 结语

本文成功构建了喀斯特地区坡面水土流失耦合模拟模型,并对其进行了精度验证。通过对喀斯特地区坡面水土流失特征的分析,明确了地形地貌、土壤特性和植被覆盖等因素对水土流失的影响机制。基于多学科理论,构建了包含水文模块、土壤侵蚀模块和植被模块的耦合模拟模型,并采用多源数据融合的方法提高了模型的准确性。通过率定和验证,模型在大多数情况下能够较好地模拟坡面水土流失的过程,为喀斯特地区水土流失的预测和治理提供了有效的工具。模型在水土流失预测和生态

保护治理方面具有重要的应用价值,可以为相关决策提供科学依据。未来应加强对地下岩溶水系和复杂生态过程的研究,提高模型的模拟精度。要不断拓展模型的应用范围,结合实际需求,为喀斯特地区的可持续发展提供更有力的支持。通过持续的研究和改进,有望构建更加完善、准确的坡面水土流失模拟模型,为喀斯特地区的生态环境保护和治理做出更大的贡献。

[参考文献]

[1] 敬俊. 石漠化驱动喀斯特坡面水土流/漏失过程与水动力特征的模拟研究[D]. 贵州师范大学, 2024.

[2] 李倩, 吴强. 我国喀斯特石漠化治理现状与发展态势研究[J]. 绿色科技, 2025, 27(10): 50-54+59.

[3] 古星. 喀斯特石漠化治理混农林植物群落结构优化配置与水土流失阻控技术研究[D]. 贵州师范大学, 2023.

作者简介:

马戎(1994—),男,汉族,甘肃·灵台人,硕士研究生,中级工程师,主要从事农田水利工程设计和水土保持综合治理等方面的研究工作。